Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(10) (2021) 681-684
DOI: 10.22060/mej.2019.15791.6204

Preparation of Polystyrene-Starch Composite by Melt Extrusion and Evaluation of its Mechanical, Thermal Biodegradation Properties

S. J. Peighambardoust[1]*, H. Heshmat Ebrahim Hesari[1], A. Shenavar[2]

[1] Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2] R&D Centre of Tabriz Petrochemical Complex (TPC), Tabriz, Iran

ABSTRACT: In this work, composites of general-purpose polystyrene and corn starch with glycerol as a plasticizer were prepared in different ratios of starch and glycerol by melt mixing in the twin-screw extruder. The structure of prepared composites was studied using scanning electron microscopy analysis. Also, to evaluate the impact strength and thermal properties of composites, we used Izod impact strength test, melt flow index and Vicat softening temperature tests. Besides, to examine the interaction between composite elements, thermal stability, and degradation process, the samples were subjected to analysis using thermogravimetric analysis. Finally, to study the biodegradation properties, composite samples were buried in soil for 12 weeks and their weight changes were measured during two-week periods. Biodegradation results and scanning electron microscopy analysis showed that the rate of biodegradation not only starch present in composites but also depends on the quality of starch particle dispersion. Notched Izod test showed the independence of samples impact strength to starch present. Due to the reduction of stress accumulation points, homogeneous dispersion of starch in the matrix leads to increase impact strength in unnotched Izod test. Melt flow index test showed that addition of starch and glycerol leads to respectively increase and decrease in composites' viscosity.

Review History:

Received: 8 Feb. 2019
Revised: 9 Agu. 2019
Accepted: 2 Sep. 2019
Available Online: 14 Sep. 2019

Keywords:

General-purpose polystyrene
Starch
Composite
Melt-extrusion
Biodegradation

1. Introduction

There is a progressive demand for use of synthetic hydrocarbon polymers due to their lightness, flexibility, and ease of processing. Due to increased use of such polymers, there is an accumulation of non-biodegradable plastics leading to environmental pollution caused by disposed polyethylene and polystyrene materials. Therefore, many attempts have been made to replace synthetic polymers with cheap sources of biodegradable polymers such as starch, cellulose and its derivatives, etc. [1]. Polystyrene is one of the synthetic polymers with thermoplastic and non-degradable nature which is extensively used as packaging material [2]. Since the biodegradable polymers suffer from weak physical and mechanical properties, preparation of composite blends of polystyrene-starch in one hand can enhance its physico-mechanical properties, and on the other hand, induces a degree of biodegradability in the prepared composite material [3-5]. Thus, the purpose of this study was to develop a biodegradable grade of polystyrene aiming as a step to reduce the environmental pollution caused by disposal of such non-degradable polymeric substances. As a novelty of this research, biodegradable polystyrene-starch composites were developed by melt extrusion technique using an industrial scale extruder aiming to increase their biodegradability and to reduce the final production cost of synthetic plastics.

*Corresponding author's email: j.peighambardoust@tabrizu.ac.ir

2. Materials and Methods

Materials used to produce composite polymers were: General Purpose Polystyrene (GPPS), Pre-gelatinized corn starch, and glycerol as a plasticizer. Glycerol was used as a plasticizer due to having both hydrophilic and lipophilic ends, which attaches to starch and polystyrene molecules and induces matrix compatibility between two polymers. To produce composite polymers of starch-polystyrene the above material, at different ratios, were blended and fed to a co-rotating twin-screw melt extruder. Molten composite polymers were obtained as strips from extruder die and transferred to a cooling water batch followed by feeding to a granulating device to make polymer granules. Finally, packaging films were made from the obtained composite granules using melt extrusion. To study the biodegradation properties, samples were buried in soil for 12 weeks and their weight changes were measured during two-week intervals. Besides, the structure of prepared composites was studied using Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis. To evaluate the impact strength and thermal properties of composites, Izod impact strength test, melt flow index and Vicat softening temperature tests were used. To evaluate interactions between composite elements, thermal stability and degradation process, the samples were subjected to thermogravimetric analysis.

3. Results and Discussion

Melt Flow Index (MFI) results for different composite

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Fig. 1. Graph of melt flow index results by percent of glycerol in different starch percentages

polymer samples showed that, as expected, starch as hard and brittle filler decreased MFI values, whereas polystyrene as a plasticizer increased MFI. On other words, polymer melt viscosity was increased and decreased by starch and polystyrene, respectively. As shown in Fig. 1, by increasing the glycerol concentration MFI was increased. In all composite polymer samples, the effect of glycerol was dominant over starch effect. Thus, there was an increased MFI and reduced melt viscosity for all composite samples compared to those for pure polystyrene samples.

Vicat softening temperature analysis showed that incorporating starch into the composite polymer increased the Vicat softening temperature due to the high molecular weight and brittle nature of starch. On the other side, incorporating plasticizer substances such as glycerol reduced the Vicat softening temperature [6]. Notched Izod test results showed the incorporating starch reduced samples impact strength compared to that of pure polystyrene. However, by

Fig. 2. SEM images before degradation of a) pure GPPS, b) GPPS-ST10-GL5 and c) GPPS-ST15-GL5 samples

incorporation of glycerol impact strength was decreased. Due to the reduction of stress accumulation points, homogeneous dispersion of starch in the matrix leads to increase in impact strength in unnotched Izod test. The results showed that composite films containing 5% glycerol had the highest impact strength values indicating a homogenous distribution and interaction between polystyrene, starch, and glycerol. From Fig. 2, SEM imaging showed that fracture surface morphology of pure polystyrene was very smooth and densely packed. However, by incorporating starch to polystyrene matrix, surface morphology of the composite films became coarse and heterogeneous. SEM images (Fig. 3) and biodegradation results from Soil Burial Test (SBT) of composite polymers after 30 days indicated the manifest of hollow voids due to starch destruction places in the composite polymer matrix.

As shown in Fig. 3, with increasing the destruction period, besides the appearance of these voids, the polystyrene matrix is also dissociated indicating a homogenous distribution of starch throughout the composite matrix which has been destructed. SBT results indicated that the rate of biodegradability was the highest in the first two weeks of soil burial period.

Fig. 3. SEM images after 30 days degradation in the soil of a) GPPS-ST15-GL5 and b) GPPS-ST10-GL5 composite samples

It was also shown that in Fig. 4, the weight loss of composite films was due to starch and glycerol destruction inside the polystyrene matrix [1, 7]. Weight loss and destruction rate were directly dependent on concentration of filler material i.e. starch and was inversely dependent on the quality of starch dispersion between the polystyrene polymeric matrix.

4. Conclusion

In this study, composite polymer of styrene and starch at different ratios with the presence of glycerol as plasticizer was produced using the melt extrusion method. Biodegradation test and SEM analysis showed that the rate of biodegradation directly depends on the concentration of starch present in the composites, and inversely depends on the quality of starch particles dispersion. It was shown that when starch is homogeneously dispersed in composite polymer matrix, its availability by destruction microorganisms becomes limited leading to lower rate of biodegradation. Notched Izod test showed the independence of samples impact strength to starch present. Due to the reduction of stress accumulation

Fig. 4.Weight loss percent of all samples by time

points, homogeneous dispersion of starch in the matrix leads to increase impact strength in unnotched Izod test. MFI test results showed that incorporating starch and glycerol to styrene matrix led to an increase and a decrease in the melt viscosities of composites, respectively. Study of starch/glycerol ratio in the obtained results showed that when an optimal amount of plasticizer was used, better interaction between starch and polystyrene was achieved providing the best condition for the dispersion of starch particles in polystyrene matrix. The optimum ratio glycerol to starch was obtained to be 1 to 3. The ratio of filler material (starch and glycerol) to polystyrene should be in a situation that bioavailability of starch molecules to the degrading microorganisms is not lost.

References

[1] A. Ashamol R.R.N. Sailaja, Mechanical, thermal, and biodegradation studies of polystyrene--phthalated starch blends using epoxy functionalized compatibilizer, Journal of Applied Polymer Science, 125(1) (2012) 313-326.

[2] D. Schlemmer, E.R. de Oliveira, M.J.A. Sales, Polystyrene/thermoplastic starch blends with different plasticizers, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 87(3) (2007) 635-638.

[3] R. Smith, Biodegradable polymers for industrial applications, CRC Press, 2005.

[4] H. Tian, Z. Tang, X. Zhuang, X. Chen, X. Jing, Biodegradable synthetic polymers: Preparation, functionalization and biomedical application, Progress in Plymer Science, 37(2) (2012) 237-280.

[5] K. Leja, G. Lewandowicz, Polymer biodegradation and biodegradable polymers - a review, Polish Journal of Environmental Studies, 19 (2010) 255-266.

[6] I. Journals, Effect of Starch on Mechanical, Electrical, Physical, Thermal Properties and Photo/Bio-Degradation of Hips - Starch Blend, 2014.

[7] C.I.R. Oliveira, F.R. Cunha, C.T. Andrade, Evaluation of biodegradability of different blends of polystyrene and starch buried in soil, Macromolecular Symposia, 290(1) (2010) 115-120.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۰، سال ۱۳۹۹، صفحات ۲۷۴۱ تا ۲۷۵۸
DOI: 10.22060/mej.2019.15791.6204

تهیه کامپوزیت پلی‌استایرن - نشاسته به روش اکستروژن مذاب و ارزیابی خواص مکانیکی، حرارتی و زیست تخریب‌پذیری آن

سید جمال الدین پیغمبردوست[۱*] حسین حشمت ابراهیم حصاری[۱]، ابوالفضل شناور[۲]

[۱] دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
[۲] بخش تحقیق و توسعه، مجتمع پتروشیمی تبریز، تبریز، ایران.

خلاصه: در این تحقیق کامپوزیت‌های پلی‌استایرن معمولی و نشاسته به همراه گلیسیرول به عنوان پلاستی‌سایزر طی فرآیند اختلاط مذاب در یک اکسترودر دو پیچه در نسبت‌های مختلف نشاسته و گلیسیرول تهیه شدند. جهت ارزیابی خواص مقاومت ضربه و دمایی کامپوزیت‌ها، از آزمون‌های مقاومت ضربه آیزود، شاخص جریان مذاب و دمای نرم‌شدگی وایکات استفاده شد. همچنین، برای بررسی برهمکنش بین اجزاء کامپوزیت‌ها، از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی و برای بررسی پایداری حرارتی و فرآیند تخریب، نمونه‌های تهیه شده تحت آنالیز وزن‌سنجی گرمایی قرار گرفتند. در نهایت، جهت بررسی خواص زیست‌تخریب‌پذیری، نمونه‌ها به مدت ۱۲ هفته در زیر خاک دفن شده و تغییرات وزن آن‌ها طی دوره‌های دو هفته‌ای اندازه‌گیری شد. آزمون شاخص جریان مذاب نشان داد که افزودن نشاسته و گلیسرول به پلی‌استایرن به ترتیب منجر به افزایش و کاهش ویسکوزیته مذاب نمونه‌ها می‌شود. نتایج تخریب زیستی و آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دادند که سرعت تخریب نمونه‌ها علاوه بر مقدار درصد وزنی نشاسته موجود در کامپوزیت‌ها، به کیفیت پخش ذرات نشاسته نیز وابسته است. در صورت پخش یکنواخت نشاسته در ماتریس پلی‌استایرن معمولی، دسترسی میکرواورگانیسم‌ها به نشاسته محدود شده و سرعت تخریب کاهش می‌یابد. نتایج آزمون آیزود با ناچ عدم وابستگی مقاومت ضربه نمونه‌ها به درصد نشاسته را نشان داد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۹
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۱۸
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۶/۲۳

کلمات کلیدی:
پلی‌استایرن
کامپوزیت
نشاسته
گلیسیرول
اکستروژن مذاب
زیست تخریب‌پذیری

۱- مقدمه

به علت سبکی، انعطاف‌پذیری و فرآیندپذیری آسان پلیمرهای هیدروکربنی سنتزی، مصرف آن‌ها به طور پیوسته در حال گسترش است. اما با توجه به افزایش مصرف آن‌ها، تجمع مداومی از پلاستیک‌های زیست تخریب‌ناپذیر وجود دارد که منجر به مشکلات دفع زباله‌های پلیمری از جمله پلی‌اتیلن، پلی‌استایرن و ... می‌شود. بنابراین تلاش‌هایی در جهت جایگزینی پلیمرهای سنتزی با پلیمرهای زیستی ارزان‌قیمت همانند نشاسته، سلولز و ... صورت گرفته است [۱].یکی از مهمترین نوع پلیمرهای سنتزی پلی‌استایرن است که یک پلیمر ترموپلاستیک بوده و در مصارف مختلفی بطور مداوم و به تنهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پلی‌استایرن امروزه در میان غالب مواد بسته‌بندی قرار می‌گیرد، در حالی‌که این پلیمر به طور خود به خودی در طبیعت تخریب نشده و آلوده‌کننده محیط زیست می‌باشد [۲]. از آنجایی‌که خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمرهای زیستی خیلی ضعیف می‌باشد، لذا جهت جایگزینی پلی‌استایرن خیلی مناسب نیستند.

یکی از روش‌های حل این مشکل، تهیه کامپوزیت‌های پلی‌استایرن-پلیمرهای زیستی می‌باشد که به این ترتیب می‌توان پلیمری تولید کرد که هم خاصیت زیست تخریب‌پذیری پلیمرهای زیستی و هم خواص فیزیکی و مکانیکی پلی‌استایرن را دارا باشد. یکی از رایج‌ترین نوع پلیمرهای زیستی که در این نوع کامپوزیت‌ها به کار می‌رود، نشاسته است که یک پلیمر طبیعی، فراوان، ارزان‌قیمت و منبع تجدیدپذیر می‌باشد [۵-۳]. تخریب شیمیایی پلیمرها ممکن است توسط یکی از واکنش‌های اکسایش، هیدرولیز و یا توسط هر دو واکنش اتفاق بیفتد. تخریب اکسیداسیونی پلیمرها در مجاورت اکسیژن هوا بوده که مرحله اول این نوع تخریب بدون تأثیرات میکروارگانیسم‌ها انجام می‌پذیرد، اما در مرحله بعدی میکروب‌ها و قارچ‌ها می‌توانند موجب تسریع آن گردند. در این حالت وجود میکروارگانیسم‌هایی که قادر به آزادسازی اکسیژن از ترکیباتی مانند نیترات‌ها، سولفات‌ها و کربنات‌ها هستند، می‌توانند موجب تسریع اکسیداسیون گردند. در هر حال این نوع تخریب یکی از مراحل مهم تخریب پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر در

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j.peighambardoust@tabrizu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

محیط زیست طبیعی به شمار می‌رود [۶]. تخریب زیستی یک پلیمر شامل از بین رفتن خواص فیزیکی و شیمیایی و کاهش وزن مولکولی پلیمر با تبدیل شدن به دی‌اکسید کربن، آب، متان و محصولات با وزن مولکولی کم دیگر تحت تأثیر میکروارگانیسم‌ها، در هر دو شرایط هوازی و بی‌هوازی به کمک واکنش‌های شیمیایی بی‌جان مانند تخریب نوری، اکسیداسیون و هیدرولیز می‌باشد [۷]. از لحاظ شیمیایی فرآیند کلی تخریب زیستی طی واکنش‌های نشان داده شده در روابط (۱) و (۲) صورت می‌گیرد که جهت سهولت فرض می‌شود $C_{polymer}$ فقط شامل کربن، هیدروژن و اکسیژن باشد. پرواضح است که در عالم واقع اجزاء و عناصر دیگری نیز وجود دارند که در این صورت در واکنش‌های ذکر شده می‌توان بر اساس فرم اکسایش یا کاهش و بسته به اینکه فرآیند هوازی باشد یا غیرهوازی، تغییرات لازم را ایجاد کرد:

- تخریب زیستی هوازی:

$$C_{polymer} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + C_{residue} + C_{biomass} \quad (۱)$$

- تخریب زیستی غیرهوازی:

$$C_{polymer} \rightarrow CO_2 + CH_4 + H_2O + C_{residue} + C_{biomass} \quad (۲)$$

$C_{polymer}$: مقدار پلیمر زیست تخریب‌پذیر شده

$C_{residue}$: مقدار پلیمر باقیمانده

$C_{biomass}$: مقدار توده زیستی تولید شده

پلیمرهایی که دچار تخریب زیستی می‌شوند، در ابتدا به توده زیستی تبدیل می‌گردند، لذا تخریب زیستی کامل زمانی رخ می‌دهد که هیچ $C_{residue}$ باقی نماند و معدنی شدن هم وقتی خواهد بود که $C_{polymer}$ کلاً به محصولات گازی و نمک‌ها تبدیل شود، ولی فرآیند اخیر بسیار آهسته انجام می‌شود؛ لذا تخریب زیستی کامل که هیچ $C_{residue}$ باقی نماند، هدفی است که باید دنبال شود [۶]. از آنجایی‌که نشاسته آب‌دوست و پلی‌استایرن آب‌گریز می‌باشد، سازگاری مناسبی بین این پلیمرها وجود ندارد که برای حل این مشکل از موادی بنام پلاستی‌سایزر و افزودنی‌های مختلفی استفاده می‌شود. پلاستی‌سایزر باید قطبی باشد تا سازگاری لازم با ماکرومولکول‌های نشاسته را تأمین کند و نیز باید وزن مولکولی آن به حد کافی پایین باشد تا بتواند به راحتی در شبکه ماکرومولکول‌های نشاسته نفوذ کند و در عین حال باید دمای جوش آن به اندازه‌ای بالا باشد که عدم خروج و تبخیر پلاستی‌سایزر از مواد تضمین شود. با توجه به نقطه جوش بالا، در دسترس بودن و قیمت پایین، ترکیب گلیسیرول به طور گسترده‌ای به عنوان پلاستی سایزر نشاسته مورد مطالعه قرار گرفته است. گلیسیرول علاوه بر ایجاد سازگاری بین دو پلیمر، در دمای بالا منجر به ژلاتینه شدن نشاسته شده و به این ترتیب خواص فیزیکی و مکانیکی آن بهبود می‌یابد [۸]. محققان بسیاری بر روی زیست تخریب‌پذیر کردن پلیمرهای هیدروکربنی توسط اضافه کردن بیوپلیمرها مطالعه کرده‌اند که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

- اسکلمر و همکاران [۹] در تحقیق خود رفتار روغن بوریتی[1] را در مقایسه با گلیسرین به عنوان پلاستی‌سایزر کامپوزیت پلی‌استایرن-نشاسته ترموپلاستیک بررسی کرده‌اند. بوریتی میوه یکی از درختان بومی جنگل‌های آمازون کشور برزیل بوده که از آن به عنوان ماده اولیه در زمینه‌های مختلف استفاده می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که کامپوزیت پلی‌استایرن-نشاسته ترموپلاستیک با مقادیر مختلف نشاسته مراحل تخریب حرارتی بیشتری از خود نشان داد. همچنین بعد از گذشت ۶ ماه از آزمایش دفن فیلم‌های این کامپوزیت در خاک، رشد میکروارگانیسم‌ها روی پلاستیک باعث بروز برخی تغییرات فیزیکی و شیمیایی شده و مشخص گردید که همه نمونه‌ها مراحل تخریب کمتری به علت وجود نشاسته در ساختار پلی‌استایرن بعد از مدت ۶ ماهه دفن در خاک از خود نشان دادند.

- مایهای و همکاران [۱۰] در پژوهش خود خواص مورفولوژیکی و فیزیکی مخلوط فوم[2] پلی‌استایرن-نشاسته ترموپلاستیک را بررسی کرده‌اند. مقدار گلیسیرول در نشاسته ترموپلاستیک مهمترین پارامتر کنترل رئولوژی و قابلیت فوم‌سازی در کامپوزیت‌ها می‌باشد. نتایج این محققان نشان دادند که ویسکوزیته نشاسته ترموپلاستیک بطور قابل توجهی با غلظت گلیسیرول کاهش یافته که مقدار آن در محدوده بین ۳۰ تا ۴۹ متغیر می‌باشد. کمترین دانسیته فوم‌ها بین ۱۷۰ الی kg/ m^3 ۲۵۰ بوده که این مقدار با کمترین مقدار گلیسیرول در نشاسته ترموپلاستیک یعنی ۳۰ درصد بدست آمده است. با افزایش مقدار گلیسیرول یا افزایش غلظت نشاسته ترموپلاستیک در کامپوزیت‌ها، مقاومت در برابر ذوب کاسته شده که منجر به ازبین رفتن بیشتر سل‌ها و در نتیجه افزایش دانسیته می‌گردد.

1 Buriti Oil
2 Foamed

- آشامول و سایلاجا [۱۱]. در پژوهش خود، کامپوزیت‌های زیست تخریب‌پذیری از پلی‌استایرن با نشاسته تاپیوکا تهیه کردند که این نشاسته تاپیوکا طی فرآیند استری شدن[1] با استفاده از ترکیب فتالیک انیدرید[2] اصلاح شده بود. نتایج حاصل نشان دادند که زیست تخریب‌پذیری کامپوزیت وقتی مقدار نشاسته داخل آن از ۲۰ به ۴۰ درصد وزنی می‌رسد، افزایش می‌یابد. برای ۲۰ تا ۵۰ درصد نشاسته فتالاته در نمونه، کامپوزیت‌های سازگار شده سرعت تخریب زیستی کمتری را نسبت به کامپوزیت‌های سازگار نشده داشته‌اند. از آنجایی‌که آب‌دوستی تخریب زیستی را تسریع می‌کند، با جایگزینی فتالیک آنیدرید به جای گروه هیدروکسیل و در نتیجه استری شدن نشاسته و نیز تقویت برخی خواص مقاومتی ناشی از سازگاری سرعت تخریب زیستی نیز کاهش می‌یابد

- در پژوهشی که سابوراج و سونداراراجان [۱۲] انجام داده‌اند، نشاسته با پلی‌استایرن مقاوم در برابر ضربه مخلوط شده و خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و فیزیکی کامپوزیت و همچنین تخریب زیستی و نوری آن بررسی گردیده و نیز اثر نشاسته روی مقاومت کششی و سختی نمونه‌ها قبل و بعد از قرار گرفتن در معرض امواج ماوراء بنفش ارزیابی شده است. پلی‌استایرن مقاوم در برابر ضربه به دلیل داشتن پیوند دوگانه غیراشباع پلی‌بوتادی‌ان که در اثر امواج ماوراء بنفش شکسته شده و دچار تخریب اکسیدی حرارتی[3] می‌شود، یک ماده تخریب‌پذیر نوری حساب می‌شود. بنابراین زنجیرهای طولانی تبدیل به مولکول‌های با وزن پایین شده و بعد از این تخریب، نمونه‌ها تفکیک و تحت کشش کمتر از ۵ درصد شکننده می‌گردند. نشاسته برخلاف پلی‌استایرن مقاوم در برابر ضربه ماده‌ای است که به راحتی دچار تخریب زیستی می‌شود. تنها اندکی پس از قرار گرفتن کامپوزیت‌ها در معرض امواج ماوراء بنفش یا محیط آزاد زیر نور خورشید و تبدیل به ماده با وزن مولکولی کمتر، این تکه‌های پلیمری به راحتی از سوی میکروارگانیسم‌ها مورد حمله قرار گرفته و تخریب زیستی می‌شوند و این بدان معنی است که این کامپوزیت‌ها هم دچار تخریب نوری و هم تخریب زیستی می‌شوند. لذا بعد از ۵ الی ۶ ماه قرار گرفتن در طبیعت پسماند چندانی از این‌ها به جا نخواهد ماند.

هدف از تحقیق حاضر نیز، تولید گرید مواد غذایی زیست تخریب‌پذیر از پلی‌استایرن بوده تا به این طریق مشکلات زیست‌محیطی حاصل از دفع زباله‌های این نوع پلیمر رفع شود. نوآوری کار حاضر در تهیه کامپوزیت‌های زیست تخریب‌پذیر پلی‌استایرن به روش اکستروژن مذاب توسط دستگاه اکسترودر می‌باشد که در مقیاس صنعتی بتوان این کامپوزیت را به تولید انبوه رسانده و از این طریق هم مشکلات زیست محیطی ناشی از استفاده از پلی‌استایرن هیدروکربنی رفع شود و هم این روش تولید در قیمت تمام شده و نهایی محصول کامپوزیت تأثیر بسزایی داشته باشد.

۲- آزمایشات

۲-۱- مواد

مواد مورد استفاده برای تهیه کامپوزیت‌های پلیمری عبارتند از: پلی استایرن معمولی[4]، نشاسته ذرت ژلاتینه شده و پلاستی‌سایزر گلیسیرول. پلی‌استایرن معمولی مورد استفاده محصول مجتمع پتروشیمی تبریز بوده و دارای دانسیته ۱/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و شاخص جریان مذاب ۷/۸ gr/ ۱۰ min می‌باشد و در کاربردهای اکستروژن و قالب‌گیری تزریقی استفاده می‌شود. نشاسته مورد استفاده نوعی نشاسته اصلاح شده محصول شرکت گلوکزان بوده که با داشتن خصوصیاتی همچون انحلال‌پذیری در آب سرد و توانایی بالا در جذب آب در طیف وسیعی از محصولات غذایی به عنوان قوام‌دهنده[5] استفاده می‌گردد. برای انعطاف بخشیدن به کامپوزیت‌های حاوی نشاسته از پلاستی‌سایزر گلیسیرول استفاده شد که این ماده به دلیل داشتن یک سر آب‌گریز و یک سر آب‌دوست نقش سازگار دهنده بین مولکول‌های پلی‌استایرن و نشاسته را بازی می‌کند. گلیسیرول بکار رفته در این تحقیق محصول شرکت صنایع شیمیایی دکتر مجللی با دانسیته ۱/۲۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است. این ماده سه گروه هیدروکسیل الکلی آب‌دوست دارد که باعث حلالیت آن در آب می شود. گلیسیرول مولکولی است که به خاطر داشتن پیوند هیدروژنی داخلی و نیز بین مولکولی انعطاف پذیری بالایی دارد.

۲-۲- تهیه نمونه کامپوزیت پلی‌استایرن معمولی-نشاسته به روش اکستروژن مذاب

ابتدا مخلوط‌های پلی‌استایرن، نشاسته و گلیسیرول در نسبت‌های

1 Esterification
2 Phthalic Anhydride
3 Thermal Oxidative Degradation
4 General Purpose Polystyrene (GPPS)
5 Thickener

شکل ۱- الف) اکسترودر دو پیچه همسوگرد مدل اس‌اِم شرکت پلاتک و ب) اکسترودر دو پیچه تولید فیلم با نام تجاری کاستینی

Fig. 1. a) Co-rotating twin-screw extruder SM Model by PLATEK Co. and b) Co-rotating twin-screw extruder for film production by Castiny Co.

مختلفی آماده شده و سپس جهت اختلاط مذاب مخلوط‌های تهیه شده از یک اکسترودر دو پیچه همسوگرد مدل اس‌اِم[1] شرکت پلاتک[2] کشور کره جنوبی با قطر ۲۰ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۳۲ استفاده شد. درجه حرارت مناطق مختلف اکسترودر از قسمت خوراک‌دهی تا خروجی به ترتیب ۱۳۵، ۱۶۵، ۱۷۰، ۱۷۰، ۱۸۰، ۱۹۰، ۱۹۰ و ۲۰۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. دور تغذیه‌کننده ۲۹/۸ دور در دقیقه و دور اکسترودر ۱۳۸ دور در دقیقه بوده است. بعد از تنظیم شرایط ذکر شده، ابتدا با مقداری پلی‌استایرن مسیر عبور مذاب تمیز شد. پس از اطمینان از تمیز شدن مسیر، مخلوط‌های تهیه شده را از طریق قیف تغذیه‌کننده وارد محفظه اکسترودر شده و مواد طی عبور از داخل اکسترودر ذوب شده و به طور کامل با هم مخلوط شدند. مذاب حاصل به صورت رشته‌هایی از حدیده[3] اکسترودر خارج شده و با عبور از حوضچه آب سرد خنک شده و وارد دستگاه گرانول‌ساز شدند تا به صورت گرانول بدست آیند. در هر بار تهیه نمونه‌ها این عملیات انجام گرفته است. در ضمن گرانول‌های هر نسبت از بین ۳۰ تا ۷۰ درصد هر اجرای اکسترودر گرفته شد. از آنجایی‌که کاربرد پلی‌استایرن در صنایع بسته‌بندی به صورت فیلم‌های پلیمری می‌باشد، لذا برای مقایسه صحیح کامپوزیت‌های پلیمری تهیه شده در این تحقیق با ظروف پلی‌استایرنی موجود در بازار، آن‌ها را نیز با استفاده اکسترودر تهیه فیلم به صورت فیلم درآورده شده است. این دستگاه نیز نوعی اکسترودر دو پیچه همانند اکسترودر بخش کامپاند با نام کاستینی[4] بوده و ساخت کشور ایتالیا است. تنها تفاوت آن با اکسترودر موجود در بخش کامپاند، قسمت حدیده آن است که در این دستگاه از حدیده مخصوص تهیه فیلم و در ادامه از غلطک‌های خنک‌کننده و انتقال‌دهنده استفاده شده است. فیلم‌ها با ضخامت ۱۰۰±۲۰ میکرومتر تهیه شدند. در این مرحله گرانول‌های تهیه شده از قسمت تغذیه وارد دستگاه شده و بعد از حرارت‌دهی و اختلاط، به صورت فیلمی نازک بر روی غلطک خنک‌کننده پخش شده و همزمان با خنک شدن به وسیله چند غلطک سرد متوالی[5] کشیده شده و در انتهای دستگاه به دور لوله‌ای چرخانده شده است. دمای قسمت‌های مختلف از بخش تغذیه تا غلتک خنک‌کننده به ترتیب ۱۸۵، ۲۱۵،

شکل ۲. نمونه فیلم کامپوزیتی پلی‌استایرن-نشاسته تهیه شده توسط غلطک‌های انتقال‌دهنده اکسترودر تولید فیلم

Fig. 2. Polystyrene-starch composite film sample prepared by transferring rolls of film extruder

1 SM
2 PLATEK
3 Die
4 Castiny
5 Chill-Rolls

۲۱۸، ۲۲۳، ۲۲۳، ۲۳۹ و ۲۳۹ درجه سانتی‌گراد بوده است. دور غلتک خنک‌کننده ۸ دور در دقیقه و دمای آن ۲۶ درجه سانتی‌گراد بود که با گردش آب سرد حاصل از سیستم سردکننده بدست آمده است. شکل ۱ شمایی از اکسترودر دو پیچه همسوگرد مدل اس‌اِم شرکت پلاتک و همچنین اکسترودر دو پیچه تولید فیلم با نام تجاری کاستینی را نشان می‌دهد. شکل ۲ نمونه فیلم کامپوزیتی پلی‌استایرن-نشاسته تهیه شده توسط غلطک‌های انتقال‌دهنده اکسترودر تولید فیلم را نشان می‌دهد. جدول ۱ کدگذاری و ترکیب درصد وزنی نمونه‌های آلیاژی تهیه شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- کدگذاری و ترکیب درصد وزنی نمونه‌های کامپوزیت تهیه شده

Table 1. Sample coding and wt. % composition of prepared composite samples

کد نمونه کامپوزیت	پلی‌استایرن (درصد وزنی)	نشاسته (درصد وزنی)	گلیسیرول (درصد وزنی)
Pure GPPS	۱۰۰	۰	۰
GPPS-ST۵-GL۳	۹۲	۵	۳
GPPS-ST۵-GL۵	۹۰	۵	۵
GPPS-ST۵-GL۷	۸۸	۵	۷
GPPS-ST۱۰-GL۳	۸۷	۱۰	۳
GPPS-ST۱۰-GL۵	۸۵	۱۰	۵
GPPS-ST۱۰-GL۷	۸۳	۱۰	۷
GPPS-ST۱۵-GL۳	۸۲	۱۵	۳
GPPS-ST۱۵-GL۵	۸۰	۱۵	۵
GPPS-ST۱۵-GL۷	۷۸	۱۵	۷

۲-۳- روش‌های شناسایی و تعیین مشخصات نمونه‌های کامپوزیتی تهیه شده

۲-۳-۱- آزمون شاخص جریان مذاب[1]

این آزمون مطابق با استاندارد آ.اِس.تی.اِم دی[2]۱۲۳۸، برای اندازه‌گیری میزان سهولت جریان یافتن یک پلیمر ترموپلاستیک مذاب انجام شده است. شاخص جریان مذاب در واقع جرمی از پلیمر (به گرم) است که بتواند در مدت زمان ۱۰ دقیقه در یک لوله مویین با قطر و طول مشخص توسط یک فشار ایجاد شده جریان یابد. بدین منظور در این تحقیق از نمونه‌هایی به شکل گرانول و با وزن ۵ گرم استفاده گردید.

1 Melt Flow Index (MFI)
2 ASTM D1238

دستگاه اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب در این تحقیق مدل زوویچ[3] ۴۱۶۰[4] ساخت کشور آمریکا بوده و در شکل ۳ نشان داده شده است.

شکل ۳.دستگاه اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب در این تحقیق مدل زوویچ ۴۱۶۰

Fig. 3. Zwich 1460 model of melt flow index used in this research

۲-۳-۲- آزمون دمای نرم‌شدگی وایکات[5]

یکی از روش‌های بررسی خواص گرما نرمی مواد ترموپلاستیک، آزمون دمای نرم‌شدگی وایکات می‌باشد. این آزمون مطابق استاندارد آ.اِس.تی.اِم دی[6]۱۵۲۵ انجام شده است. در دستگاه مدل اچ‌دی-پی‌سی[7] شرکت یاسودا[8] ژاپن، بعد از نفوذ سوزن در نمونه به اندازه ۱ میلی‌متر دمای بدست آمده، به عنوان دمای نرم‌شدگی ماده پلاستیکی گزارش شده است. نمونه ها در ابعاد ۱۰×۱۰ میلی‌متر و به شکل مربع توسط فرآیند قالب‌گیری تزریقی تهیه شدند. برای آزمون در مورد هر کامپوزیت حداقل دو نمونه مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۴ شماتیک نحوه اندازه‌گیری دمای نرم‌شدگی وایکات و دستگاه اندازه‌گیری این دما را نشان می‌دهد.

3 Zwich
4 Zwich 4160
5 Vicat Softening Temperature
6 ASTM D 1525
7 HD-PC
8 Yasuda

شکل ۴. شماتیک نحوه اندازه‌گیری دمای نرم‌شدگی وایکات و دستگاه مدل اچ‌دی-پی‌سی شرکت یاسودا ژاپن

Fig. 4. Schematic of Vicat softening temperature measuring and HD-PC model of instrument by Yasuda co. of Japan

۲-۳-۳- آزمون مقاومت ضربه آیزود[1]

جهت ارزیابی مقاومت ضربه نمونه‌ها از آزمون ضربه آیزود استفاده شده است. این آزمون مطابق استاندارد آ.اس.تی.اِم دی[2] ۲۵۶ صورت گرفته و نمونه‌ها در ابعاد بیان شده در شکل ۵ به روش قالب‌گیری تزریقی تهیه شده‌اند و شکاف بعد از قالب‌گیری بر روی نمونه با تراش نمونه ایجاد شد. آزمون با استفاده از دستگاه مدل آر.آی.سی ۶۹۶۷[3] شرکت سیست[4] کشور ایتالیا در دو حالت شکاف‌دار و بدون شکاف انجام شد. اندازه‌گیری‌ها بر روی پنج نمونه از هر کامپوزیت انجام

شکل ۵. ابعاد نمونه قالب‌گیری تزریقی جهت انجام آزمون مقاومت ضربه آیزود

Fig. 5. Dimensions of injection molded sample for Izod impact strength test

1 Izod Impact Strength Test
2 ASTM D256
3 RIC 6967
4 Ceast

گرفت و نتایج به صورت میانگین و بر حسب کیلوژول بر مترمربع گزارش شد. در شکل ۵ پارامترهای A تا E مربوطه به هندسه نمونه قالب‌گیری تزریقی شده برای انجام آزمون مقاومت ضربه آیزود بوده که مقادیر آن‌ها در ذیل شکل مشخص شده است. شکل ۶ دستگاه انجام آزمون مقاومت آیزود جهت ارزیابی مقاومت ضربه نمونه‌های فیلمی تهیه شده را نشان می‌دهد.

۲-۳-۴- آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی[5]

برای تصویربرداری میکروسکوپی از سطح شکست تازه نمونه‌های تهیه شده، مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شده است. در این آنالیز تصویربرداری از سطح مقطع فیلم نمونه‌ها انجام شد. برای دست‌یابی به سطح شکست مطلوب، نمونه‌ها در نیتروژن مایع قرار گرفته و بعد از ترد شدن کامل آن‌ها، دچار شکست شدند و سطح مقطع شکست آن‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل وگا تسکان[6] ساخت کشور جمهوری چک در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی مورد بررسی قرار گرفت. ولتاژ کاری دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی بین ۲۰ تا ۳۰۰ کیلوولت بوده است. به دلیل پلیمری و نارسانای الکتریکی بودن نمونه‌های مورد بررسی، قبل از تصویربرداری برای ایجاد پل‌های هدایتی عبور الکترون‌ها از سطح نمونه، نمونه‌ها در حد چند نانومتر با بخار طلا پوشش داده شدند.

5 Scanning Electron Microscope, SEM
6 VEGA TEScan

شکل ۶. دستگاه انجام آزمون مقاومت آیزود جهت ارزیابی مقاومت ضربه نمونه‌های فیلمی تهیه شده

Fig. 6. Instrument of Izod impact strength test for Impact strength measurement of prepared film samples

۲-۳-۵- آنالیز حرارتی وزن‌سنجی گرمایی[1]

برای بررسی پایداری حرارتی مخلوط‌های پلیمری تهیه شده و فرآیند تخریب آن‌ها، از آنالیز وزن‌سنجی گرمایی استفاده شده است. بدین منظور نمونه‌های ۱۰ الی ۱۵ میلی‌گرمی جدا شده از فیلم‌های تهیه شده را تحت اتمسفر هلیوم و با استفاده از یک برنامه کامپیوتری حرارت‌دهی ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه در یک دستگاه وزن‌سنجی گرمایی مدل ان ۸۱ آ ۱۷۵۰[2] شرکت لنسیس[3] ساخت کشور آلمان از دمای محیط تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت‌دهی شدند. دیاگرام‌های حرارتی حاصل از این آنالیز، درصد اتلاف وزنی نمونه‌ها برحسب دما یا به عبارت بهتر رفتار تخریب حرارتی نمونه‌های تهیه شده را در محدوده دمایی ذکر شده نشان می‌دهند.

۲-۳-۶- آزمون ارزیابی زیست تخریب‌پذیری

جهت ارزیابی زیست تخریب‌پذیری کامپوزیت‌های پلی‌استایرن-نشاسته از آزمون دفن در زیر خاک بر اساس استاندارد آ.اِس.تی.اِم جی[4] ۱۶۰ استفاده شده است. بر طبق این استاندارد بعد از خارج کردن نمونه‌ها از خاک جهت اندازه‌گیری وزن آن‌ها، امکان بازگشت آن‌ها به خاک وجود ندارد. بنابراین تعداد ۱۸ عدد از هر نمونه به صورت فیلم‌هایی با ابعاد ۵۰×۵۰ میلی‌متر در خاک دفن شده و در یک مدت ۱۲ هفته‌ای (سه ماهه) در هر دو هفته یک بار ۳ عدد از هر نمونه را از خاک خارج کرده و بعد از شستن با آب و آب مقطر

شکل ۷. تصاویر نحوه دفن نمونه‌های فیلمی کامپوزیت‌های پلی‌استایرن-نشاسته تهیه شده

Fig. 7. Images of Burial test for polystyrene-starch composite film samples

و خشک کردن در آون، وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد. جهت تسهیل عملیات نمونه‌های هر دوره دو هفته‌ای که ۳۰ عدد بوده در یک ظرف پلاستیکی ۲۷ لیتری به ابعاد ۴۸×۳۲×۱۸ دفن و کل نمونه‌ها که ۱۸۰ عدد می‌باشد در ۶ ظرف دفن گردید. البته تمامی نمونه‌ها قبل از دفن در خاک وزن شده و مقادیر وزن آن‌ها ثبت شد. بر اساس این استاندارد خاک استفاده شده باید مخلوطی از خاک مزرعه، شن و کود حیوانی با وزن یکسان باشد. رطوبت خاک باید بین ۲۰ و ۳۰ درصد نگهداری شود. میانگین درصد کاهش وزن هر سه نمونه در هر دوره محاسبه شده و نمودار داده‌های حاصل جهت تحلیل نتایج رسم شده است. جهت اندازه‌گیری رطوبت خاک، ۲۰ گرم از خاک را اندازه‌گیری کرده و به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. بعد از این مدت وزن نمونه دوباره اندازه‌گیری نموده و با توجه به کاهش وزن خاک، رطوبت آن محاسبه گردید. برای تنظیم رطوبت خاک، وزن ظرف پر از خاک اندازه‌گیری شد و با توجه به وزن و رطوبت اندازه‌گیری شده خاک، آب مورد نیاز جهت رسیدن

1 Thermogravimetric Analysis, TGA
2 N81 A1750
3 LINSEIS
4 ASTM G160

شکل ۸: نمودار نتایج حاصل از آزمون شاخص جریان مذاب بر حسب تغییرات درصد گلیسیرول در درصدهای مختلف نشاسته

Fig. 8. Graph of melt flow index results by percent of glycerol in different starch percentages

به رطوبت مورد نظر استاندارد، به ظروف افزوده شد. شکل ۷ تصاویر نحوه دفن نمونه‌های فیلمی کامپوزیت‌های پلی‌استایرن- نشاسته تهیه شده را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمون شاخص جریان مذاب

نتایج حاصل از آنالیز شاخص جریان مذاب برای نمونه‌های کامپوزیتی مختلف در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. انتظار می‌رود که نشاسته به عنوان یک پر کننده سخت و شکننده، شاخص جریان مذاب را کاهش دهد و گلیسیرول به عنوان یک پلاستی‌سایزر شاخص جریان مذاب را افزایش دهد. به عبارتی نشاسته موجب افزایش ویسکوزیته مذاب و گلیسیرول موجب کاهش ویسکوزیته مذاب پلیمر می‌شود [۱۳]. در شکل ۸ نمودار مقادیر شاخص جریان مذاب بر حسب تغییرات گلیسیرول در درصدهای مختلف نشاسته رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد گلیسیرول شاخص جریان مذاب افزایش می‌یابد که نتیجه مورد انتظار را ارئه می‌دهد. ولی نمودار مقادیر شاخص جریان مذاب کامپوزیت‌ها بر حسب تغییرات نشاسته در درصدهای مختلف گلیسیرول که در شکل ۹ آورده شده است، روند نامنظمی را نشان می‌دهد. برای بررسی این موضوع با توجه به وابستگی مقدار شاخص جریان مذاب به نسبت گلیسیرول به نشاسته، نمودار تغییرات شاخص جریان مذاب را بر حسب درصد پر کننده (نشاسته+گلیسیرول) موجود در پلی‌استایرن معمولی در سه نسبت پایین (۰/۳۳-۰/۲)، متوسط (۰/۷-۰/۴۷) و بالا (۱/۴-۱) گلیسیرول به نشاسته (شکل ۱۰) رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هر یک از این نمودارها روند ثابت و خاصی در افزایش شاخص جریان مذاب با افزایش درصد پر کننده را نشان می‌دهند که این موضوع نشان‌دهنده یکسان بودن برهمکنش

شکل ۹: نمودار نتایج حاصل از آزمون شاخص جریان مذاب بر حسب تغییرات درصد نشاسته در درصدهای مختلف گلیسیرول

Fig. 9. Graph of melt flow index results by percent of starch in different glycerol percentages

شکل ۱۰. نمودار تغییرات شاخص جریان مذاب بر حسب درصد پرکننده (نشاسته+گلیسیرول) در پلی‌استایرن معمولی در نسبت‌های مختلف گلیسیرول به نشاسته

Fig. 10. Graph of melt flow index changes by filler percent (starch+glycerol) in GPPS at different glycerol/starch ratios

بین نشاسته و گلیسیرول در هر یک از این نسبت‌ها است. با توجه به نمودارها با افزایش نسبت گلیسیرول به نشاسته، شیب نمودارها افزایش می‌یابد. یعنی افزایش درصد نشاسته نسبت به درصد گلیسیرول منجر به کاهش اثر گلیسیرول شده و سرعت افزایش شاخص جریان مذاب را کاهش می‌دهد. در تمامی کامپوزیت‌های تهیه شده اثر گلیسیرول بر اثر نشاسته غالب بوده و در نتیجه تمامی آن‌ها نسبت به پلی‌استایرن معمولی خالص، افزایش شاخص جریان مذاب یا کاهش ویسکوزیته مذاب را نشان می‌دهند.

۳-۲- آزمون دمای نرم‌شدگی وایکات

نتایج حاصل از این آزمون تغییرات بسیار نامحسوسی را در دمای نرم‌شدگی وایکات با افزودن پرکننده‌های نشاسته و گلیسیرول به پلی‌استایرن معمولی نشان می‌دهد. نمودار مقادیر دمای نرم‌شدگی وایکات بدست آمده از این آزمون بر حسب تغییرات درصد نشاسته در درصدهای مختلف گلیسیرول در شکل ۱۱ آورده شده است. تمامی نتایج افت دمای نرمی وایکات را نسبت به پلی‌استایرن معمولی نشان می‌دهند. به دلیل وزن مولکولی بالا و ساختار سخت و شکننده نشاسته، افزودن آن به پلیمر پایه در کل منجر به افزایش دمای نرم‌شدگی وایکات می‌شود. از طرفی افزودن پلاستی‌سایزری مانند گلیسیرول که وزن مولکولی آن نسبت به پلی‌استایرن معمولی بسیار پایین است، منجر به افت دمای نرمی وایکات پلیمر پایه می‌شود [۱۳]. در این نمودار مشاهده می‌شود که برآیند تأثیر این دو پرکننده منجر به کاهش دمای نرمی وایکات در همه کامپوزیت‌ها شده است. به عبارتی می‌توان گفت که در این جا اثر گلیسیرول بر اثر نشاسته

شکل ۱۱.نمودار نتایج حاصل از آزمون دمای نرم‌شدگی وایکات بر حسب درصد نشاسته در درصدهای مختلف گلیسیرول

Fig. 11. Graph of Vicat softening temperature results by percent of starch in different glycerol percentages

شکل ۱۲. نمودار نتایج حاصل از آزمون مقاومت ضربه آیزود شکاف‌دار بر حسب تغییرات درصد گلیسیرول در درصدهای مختلف نشاسته

Fig. 12. Graph of notched Izod impact strength test results by percent of glycerol in different starch percentages

غلبه کرده و دمای نرمی وایکات کاهش یافته است. با توجه به این‌که تغییرات بسیار کم هستند و محدوده خطای این آزمون بالا است، نمی‌توان در مورد تغییرات دمای نرمی وایکات نسبت به تغییرات درصد نشاسته و گلیسیرول اظهار نظر کرد.

۳-۳- آزمون مقاومت ضربه آیزود

نمودار تغییرات مقاومت ضربه آیزود شکاف‌دار کامپوزیت‌های تهیه شده بر حسب تغییرات درصد گلیسیرول در درصدهای مختلف نشاسته در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با ورود نشاسته، مقاومت ضربه نسبت به پلیمر پایه (پلی‌استایرن معمولی) کاهش می‌یابد، ولی با افزایش درصد گلیسیرول، مقاومت ضربه افزایش می‌یابد و حتی در مقادیر ۷ درصد گلیسیرول مقاومت ضربه کامپوزیت‌ها بالاتر از مقاومت ضربه پلیمر پایه می‌باشد. نشاسته یک پلیمر سخت و شکننده است که افزودن آن به پلی‌استایرن معمولی منجر به افت مقاومت ضربه آن می‌شود. از آنجایی‌که جهت بهبود مقاومت ضربه پلیمرهای شکننده (پلی‌استایرن معمولی یک پلیمر شکننده است)، از یک پلاستی‌سایزر با وزن مولکولی کم استفاده می‌شود، در این‌جا نیز گلیسیرول نقش یک اصلاح‌کننده خواص ضربه را در کامپوزیت‌ها بازی می‌کند. به طوری‌که در گلیسیرول ۷ درصد، اثر گلیسیرول بر نشاسته غلبه کرده و مقاومت ضربه کامپوزیت بیشتر از پلی‌استایرن معمولی خالص می‌شود [۱۴]. با توجه به نمودارها تغییرات نشاسته تأثیری در مقادیر مقاومت ضربه کامپوزیت‌ها ندارد. علت آن این است که مقادیر نشاسته به حد آستانه خود نرسیده است. به عبارت دیگر در مقادیر پایین نشاسته، پیوستگی ماتریس پلیمری هنوز پا بر جاست و مقاومت ضربه نمونه‌ها خیلی تحت تأثیر درصد

شکل ۱۳. نمودار نتایج حاصل از آزمون مقاومت ضربه آیزود بدون ناچ بر حسب تغییرات درصد نشاسته در درصدهای مختلف گلیسیرول

Fig. 13. Graph of unnotched Izod impact strength test results by percent of starch in different glycerol percentages

نشاسته نیست. در حقیقت در درصدهای پایین نشاسته، فقط وجود ذرات نشاسته بر مقاومت ضربه مؤثر است نه مقدار آن. در آزمون مقاومت ضربه نمونه‌های بدون شکاف، مقادیری بدست آمده به مراتب بسیار بالاتر از آزمون مقاومت ضربه شکاف‌دار می‌باشند. چون انرژی بسیار زیادی جهت ایجاد ترک برای شکست نیاز است. نتایج بدست آمده از این آزمون در شکل ۱۳ نشان می‌دهند که مقاومت ضربه در این حالت نسبت به پلی‌استایرن معمولی خالص کاهش یافته است که علت آن این است که ذرات نشاسته در داخل ماتریس پلیمری به عنوان مراکز تجمع تنش عمل کرده و ایجاد ترک در پلیمر جهت شکست را تسهیل می‌کنند. به همین دلیل است که درصدهای پایین نشاسته در آزمون آیزود شکاف‌دار که در آن قبل آزمون بر روی نمونه ترک ایجاد می‌شود، تأثیری ندارد. در آزمون آیزود بدون شکاف اثرات ترکیب درصدهای نشاسته و گلیسیرول بر نتایج آزمون بسیار پیچیده است، زیرا نتایج حاصل از این آزمون مستقیماً با مورفولوژی و نحوه پخش ذرات در کامپوزیت‌ها مرتبط است به این ترتیب که پخش نامناسب و نامتقارن ذرات منجر به تقویت مراکز تجمع تنش (بزرگتر شدن ذرات نشاسته) و تسهیل در ایجاد ترک می‌شود و مقاومت ضربه نمونه‌ها کاهش می‌یابد. با این استدلال و با توجه به نمودار می‌توان گفت که پخش ذرات نشاسته در نمونه‌های GPPS-ST15-GL5 و GPPS-ST10-GL5 نسبت به نمونه‌های دیگر در بهترین شرایط است برای این‌که بیشترین مقاومت ضربه را دارند. همچنین نمونه‌های GPPS-ST15-GL7 و GPPS-ST10-GL7 که کمترین مقاومت ضربه را از خود نشان داده‌اند، نسبت به نمونه‌های دیگر بدترین پخش ذرات را دارند. همچنین با بررسی نمودار مشخص گردید که ترکیب درصدهای حاوی ۵ درصد گلیسیرول، بیشترین مقدار مقاومت ضربه را در هر ترکیب درصد نشاسته ارائه می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که در کامپوزیت‌های حاوی ۵ درصد گلیسیرول برهمکنش بین سه جزء کامپوزیت مناسب و پخش ذرات همگن‌تر است.

۳-۴- آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های GPPS-ST15-GL5 و GPPS-ST10-GL5 و پلی‌استایرن معمولی خالص قبل از تخریب با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با مقایسه تصاویر کامپوزیت‌ها با پلی‌استایرن معمولی خالص می‌توان توده‌های نشاسته را در ماتریس پلیمری تشخیص داد. با توجه به مورفولوژی سطح شکست نمونه پلی‌استایرن معمولی که بسیار متراکم و صاف می‌باشد، می‌توان گفت که با ورود نشاسته به ساختار پلی‌استایرن، مورفولوژی صاف و متراکم تبدیل به مورفولوژی زبر و ناهموار شده است که از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی شکل ۱۴ نیز کاملا مشخص است.

در شکل ۱۵ نیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت‌های GPPS-ST15-GL5 و GPPS-ST10-GL5 بعد از یک ماه تخریب در خاک نشان داده شده است. حفره‌های خالی در ماتریس پلیمری محل توده‌های نشاسته است که در اثر تخریب زیستی از بین رفته و از ماتریس پلیمری خارج شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پراکندگی حفره‌ها در نمونه GPPS-ST15-GL5 یکنواخت‌تر از نمونه GPPS-ST10-GL5 است که نشان از پخش مناسب ذرات نشاسته در نمونه GPPS-ST15-GL5 است. این تفاوت به وجود

شکل ۱۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی قبل از تخریب الف) نمونه GPPS خالص ب) نمونه GPPS-ST10-GL5 و ج) نمونه GPPS-ST15-GL5
Fig. 14. SEM images before degradation of a) pure GPPS, b) GPPS-ST10-GL5 and c) GPPS-ST15-GL5 samples

آمده در مورفولوژی نمونه‌ها مربوط به نسبت گلیسرول به نشاسته مورد استفاده در کامپوزیت‌ها می‌باشد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه GPPS-ST15-GL5 بعد از یک ماه و دو ماه تخریب در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که از تصاویر مشخص است، با افزایش مدت زمان تخریب، علاوه بر به وجود آمدن حفره ها، ماتریس پلی‌استایرن معمولی به کلی دچار گسست شده است. این موضوع نشان از حضور نشاسته در کلیه مناطق پلیمری است. به این طریق اگر بتوانیم توده‌های بزرگ نشاسته را حذف کنیم، پخش نشاسته در پلی‌استایرن معمولی به طور کامل خواهد بود و خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت به شدت بهبود خواهد یافت. تا این حد از بین رفتن پیوستگی ماتریس پلیمری در اثر تخریب نشاسته در طبیعت، منجر به افت شدید خواص مکانیکی کامپوزیت شده و سرعت تخریب ماتریس پلیمری باقیمانده به شدت افزایش خواهد یافت.

شکل ۱۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بعد از یک ماه تخریب در خاک الف) نمونه کامپوزیت GPPS-ST15-GL5 و ب) نمونه GPPS-ST10-GL5
Fig. 15. SEM images after 30 days degradation in soil of a) GPPS-ST15-GL5 and b) GPPS-ST10-GL5 composite samples

شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه GPPS-ST15-GL5 الف) بعد از یک ماه تخریب و ب) بعد از دو ماه تخریب

Fig. 16. SEM images of GPPS-ST15-GL5 composite sample after a) 30 and b) 60 days degradation

۳-۵- آنالیز حرارتی وزن‌سنجی گرمایی

به طور کلی نتایج آزمون وزن‌سنجی گرمایی نشان‌دهنده افزایش مراحل تخریب حرارتی کامپوزیت‌ها و کاهش مقاومت حرارتی آن‌ها نسبت به نمونه خالص پلی‌استایرن معمولی به دلیل استفاده از پرکننده‌های نشاسته و گلیسرول می‌باشد. همان‌طور که از نمودار شکل ۱۷ (نمونه‌ها قبل از تخریب) دیده می‌شود، از حدود دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد (دمای جوش اولیه گلیسرول) کاهش وزن نمونه‌های حاوی نشاسته و گلیسیرین شروع می‌شود که کاهش وزن مرحله اول مربوط به گلیسیرین می‌باشد و بین دماهای ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به حداکثر خود می‌رسد. با مقایسه دو منحنی نمونه‌های GPS-ST10-GL5 و GPS-ST10-GL7 مشاهده می‌شود که در نمونه با مقدار گلیسیرین بیشتر یعنی نمونه GPS-ST10-GL7 کاهش وزن بیشتری را به این دلیل که در ابتدا گلیسیرین بیشتری داشته، شاهد هستیم. کاهش وزن مرحله دوم مربوط به تخریب نشاسته می‌باشد که از حدود دمای ۳۱۰ درجه سانتی‌گراد شروع و تا دمای ۳۴۰ درجه سنتی‌گراد ادامه می‌یابد. در این ناحیه نیز این مطلب مشهود است که به دلیل اینکه نمونه GPS-ST15-GL5 مقدار نشاسته بیشتری نسبت به نمونه‌های دو منحنی دیگر دارد، لذا کاهش وزن آن نیز نسبت به سایرین بیشتر خواهد بود؛ و در پایان کاهش عمده که ناشی از تخریب ماتریس پلی‌استایرنی نمونه‌ها است،

شکل ۱۷. منحنی‌های آنالیز وزن‌سنجی گرمایی GPPS خالص و نمونه‌های GPPS-ST10-GL7، GPPS-ST10-GL5 و GPPS-ST15-GL5 قبل از تخریب زیستی

Fig. 17. TGA curves of pure GPPS, GPPS-ST10-GL5, GPPS-ST10-GL7 and GPPS-ST15-GL5 composite samples before bio-degradation

شکل ۱۸. منحنی‌های آنالیز وزن‌سنجی گرمایی پلی‌استایرن خالص و نمونه GPPS-ST10-GL7 قبل و بعد از تخریب زیستی

Fig. 18. TGA curves of pure GPPS and GPPS-ST10-GL7 composite samples before and after biodegradation

در همه نمونه‌ها روند مشابهی دارد [۱۵ و ۲].

با مقایسه منحنی‌های وزن‌سنجی گرمایی نمونه GPPS-ST10-GL7 قبل و بعد از تخریب زیستی شکل ۱۸ مشخص گردید که مراحل تخریب حرارتی برای نمونه دفن شده، ناپدید شده است که این موضوع نشان‌دهنده خارج شدن نشاسته و گلیسرول موجود در کامپوزیت، در اثر فعالیت میکروارگانیسم‌ها است. کاهش شیب مشاهده شده در منحنی نمونه GPS-ST10-GL7 بعد از تخریب زیستی نسبت به منحنی پلی‌استایرن خالص (شکل ۱۷) نشان‌دهنده وجود مقدار بسیار اندکی از پرکننده‌ها است که به دلیل عدم دسترسی میکروارگانیسم‌ها تخریب نشده‌اند. این موضوع در مورد نمونه GPS-ST15-GL5 بیشتر مشهود است. در نمودار شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که در منحنی GPS-ST15-GL5 تخریب شده، مرحله تخریب در حدود دمای ۳۱۰ درجه سانتی‌گراد که مربوط به نشاسته می‌باشد، همچنان موجود است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل عدم دسترسی میکروارگانیسم‌ها و یا ناکافی بودن زمان تخریب زیستی مقداری از نشاسته در کامپوزیت باقی مانده است.

۳-۶- آزمون ارزیابی زیست تخریب‌پذیری

آزمایشات زیست تخریب‌پذیری دارای اهمیتی اساسی برای تولید مواد سازگار با محیط زیست می‌باشند. آزمایشات دفن در خاک که مبتنی بر وزن نمونه به عنوان تابعی از زمان تخریب بوده، روش مفیدی برای ارزیابی زیست تخریب‌پذیری مواد هستند. در پژوهش حاضر، تست‌ها

شکل ۱۹. .منحنی‌های آنالیز وزن‌سنجی گرمایی پلی‌استایرن خالص و نمونه GPPS-ST15-GL5 قبل و بعد از تخریب زیستی

Fig. 19. TGA curves of pure GPPS and GPPS-ST15-GL5 composite samples before and after biodegradation

شکل ۲۰. تصاویر برخی از نمونه‌ها قبل و بعد از تخریب سه ماهه که با دوربین دیجیتالی تهیه شده است، الف و ب) GPPS-ST10-GL7، ج و د) GPPS-ST15-GL7، ه و و) GPPS-ST15-GL5

Fig. 20. Digital images of some samples before and after biodegradation a,b) GPPS-ST10-GL7, c,d) GPPS-ST15-GL7 and e,f) GPPS-ST15-GL5

در دمای اتاق و با در نظر گرفتن روش کاهش وزن نمونه‌ها پس از دفن در خاک انجام شدند. تصاویر برخی از نمونه در شکل ۲۰ آورده شده است. تغییرات وزن نمونه‌های مختلف کامپوزیت پلی‌استایرن، گلیسیرول و نشاسته در نمودار شکل ۲۱ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که سرعت تخریب زیستی برای کامپوزیت‌های تهیه شده طی دو هفته اول دفن در خاک به ویژه برای نمونه‌های GPPS-ST15-GL7 و GPPS-ST10-GL7 به بالاترین مقدار خود رسیده است. فعالیت میکروبی پس از آن بازه زمانی مخصوصاً برای نمونه‌های GPPS-ST5-GL3 و GPPS-ST10-GL3 کاهش یافته است. همانطور که نیز در قسمت قبلی نیز اشاره شد، پلی‌استایرن زیست تخریب‌ناپذیر است و هرگز مورد حمله میکروارگانیسم‌ها قرار نمی‌گیرد و از آنجایی‌که تمامی فرآیندهای انجام گرفته در تهیه کامپوزیت‌ها فیزیکی می‌باشد، مولکول‌های پلی‌استایرن موجود در کامپوزیت‌ها بدون تغییر باقی خواهند ماند.

بنابراین تنها دلیل کاهش وزن نمونه‌ها تخریب نشاسته و گلیسیرول و خروج آن‌ها از ماتریس پلی‌استایرن می‌باشد. به این ترتیب همان‌طور که در مقالات دیگر نیز اشاره شده است [۱۶ و ۱]، باید سرعت و کاهش وزن نمونه‌ها متناسب با درصد نشاسته و گلیسیرول موجود در نمونه‌ها باشد. ولی با توجه به نمودار شکل ۲۲ مشخص است که برخی از نمونه‌ها (GPPS-ST15-GL5 و GPPS-ST10-GL3) این تناسب را نقض کرده‌اند. از آنجایی‌که درصد نشاسته در کامپوزیت‌های تهیه شده نسبت به پلی‌استایرن معمولی بسیار پایین می‌باشد، در صورت توزیع یکنواخت ذرات نشاسته در ماتریس پلی‌استایرن، به راحتی ذرات توسط ماتریس احاطه خواهند شد و دسترسی میکروارگانیسم‌ها به فاز نشاسته محدود خواهد شد [۱۶]. به عبارت دیگر سرعت کاهش وزن نمونه‌ها و تخریب نمونه‌ها در کامپوزیت‌های با درصد پر کننده پایین به دو عامل درصد پر کننده (رابطه مستقیم) و کیفیت پخش

شکل ۲۱. درصد کاهش وزن کل نمونه‌ها بر حسب زمان

Fig. 21. Weight loss percent of all samples by time

شکل ۲۲. درصد کاهش وزن نمونه‌های نهایی بر حسب درصد نشاسته

Fig. 22. Weight loss percent of final samples by starch percent

ذرات (رابطه معکوس) بستگی دارد.

در شکل ۲۳ نمودار کیفی تخریب کامپوزیت‌ها در زیر خاک بر حسب درصد نشاسته و درصد گلیسیرول آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های GPPS-ST15-GL5 و GPPS-ST10-GL3 نسبت به نمونه‌های اطراف خود کمترین تخریب را دارند که می‌توان گفت عامل پخش یکنواخت ذرات در سرعت تخریب آن‌ها تأثیرگذار بوده است، یا به عبارتی پخش ذرات در آن نسبت به نمونه‌های دیگر مناسب می‌باشد. علت پخش مناسب ذرات در نمونه‌های GPPS-ST15-GL5 و GPPS-ST10-GL3 را می‌توانیم به نسبت گلیسیرول به نشاسته مربوط سازیم. با بررسی این نسبت در نمودار شکل ۲۳ مشخص گردید که نمونه‌های GPPS-ST15-GL5 و GPPS-ST10-GL3 دارای مقدار یکسانی از نسبت گلیسیرول به نشاسته (۰/۳ الی ۰/۳۳) می‌باشند. به عبارتی می‌توان گفت که در این نسبت، پلی‌استایرن، نشاسته و گلیسیرول بهترین برهمکنش را

شکل ۲۳. نمودار کیفی کاهش وزن نمونه‌ها در مرحله نهایی بر حسب درصد نشاسته، درصد گلیسیرول و نسبت گلیسیرول به نشاسته

Fig. 23. Qualitative curve of samples' weight loss in final by starch and glycerol percent and glycerol/starch ration

دارند که منجر به توزیع یکنواخت نشاسته در ماتریس پلی‌استایرن شده است و پلاستی‌سایزر (گلیسیرول) در مقدار بهینه خود می‌باشد. در مقالات نیز به مقدار بهینه پلاستی‌سایزر اشاره شده است [۱۷]. در مقادیر کمتر از مقدار بهینه (نمونه GPPS-ST15-GL3)، نشاسته به طور کامل ژلاتینه نشده و به این ترتیب کشش و ویسکوزیته بسیار بالای نشاسته مانع تغییر شکل و پخش مناسب ذرات نشاسته توسط ماتریس پلی‌استایرن معمولی می‌شود. در مقادیر بالاتر از مقدار بهینه پلاستی‌سایزر (به عنوان مثال نمونه GPPS-ST10-GL7)، نیز مقدار اضافی پلاستی‌سایزر منجر به جدایش فازی بین فاز نشاسته و فاز پلی‌استایرن معمولی شده و تنش سطحی بین دو فاز کاهش می‌یابد. این پدیده منجر به عدم انتقال مناسب تنش جهت تغییر شکل و توزیع فاز نشاسته می‌گردد و همین امر باعث ایجاد مورفولوژی خشن و زبر در کامپوزیت‌های با این نسبت می‌شود [۱۷]. تأثیر تخریب نشاسته بر سطح فیلم نمونه‌ها در شکل ۲۴ نشان داده شده است. این ناهمواری‌های سطح فیلم نمونه‌ها نشانگر کیفیت پخش ذرات نشاسته نیز می‌باشد. نمونه GPPS-ST15-GL5 با نسبت بهینه پلاستی سایزر دارای سطحی صاف و بدون ناهمواری می‌باشد. در تصویر نمونه GPPS-ST15-GL3 مشخص است که به دلیل کافی نبودن پلاستی‌سایزر، نشاسته ژلاتینه نشده و ذرات آن بدون تغییر در فیلم باقی مانده‌اند. با توجه به تصویر نمونه GPPS-ST10-GL7 مقادیر اضافی پلاستی‌سایزر منجر به عدم پخش مناسب نشاسته و کشیده شدن آن در جهت کشیدگی فیلم (هنگام تهیه فیلم با دستگاه تزریق) می‌شود.

با توجه به منحنی‌های قبلی در شکل ۲۱ مشخص است که سرعت

شکل ۲۴. تصاویر سطح فیلم نمونه‌ها بعد از تخریب سه ماهه الف) GPPS-ST15-GL5، ب) GPPS-ST15-GL3 و ج) GPPS-ST10-GL7

Fig. 24. Surface images of film samples after 90 days degradation a) GPPS-ST15-GL5, b) GPPS-ST15-GL3 and c) GPPS-ST10-GL7

کاهش وزن نمونه‌ها (شیب نمودارها) به تدریج و در طول زمان کاهش می‌یابد. ولی این موضوع در مورد نمونه شماره GPPS-ST15-GL5 صادق نیست. سرعت تخریب این نمونه در طول زمان ثابت بوده به طوری‌که میزان تخریب آن در مراحل پایانی نسبت به نمونه GPPS-ST15-GL3 که قبلاً کمتر بوده، بیشتر می‌باشد. این حالت نشان می‌دهد که فقط سرعت تخریب این نمونه پایین است نه پتانسیل تخریب آن. به عبارت دیگر این کامپوزیت می‌تواند در طول دوره‌های طولانی‌تر به بالاترین میزان تخریب خود که معادل درصد پر کننده موجود در ماتریس پلی‌استایرن معمولی است برسد. همچنین نمودار شکل ۲۱ نشان می‌دهد که نمونه GPPS-ST10-GL3 کمترین میزان تخریب را دارد و میزان تخریب آن در تمامی دوره‌ها ثابت بوده است. به عبارتی این نمونه که قبلاً اشاره شد، پخش ذرات نشاسته در آن بسیار عالی است، در مقابل تخریب زیستی مقاوم است. در توضیح این رفتار می‌توان گفت که حجم پر کننده موجود در این کامپوزیت به حدی پایین است که پخش یکنواخت ذرات نشاسته در آن منجر به احاطه کامل آن‌ها توسط ماتریس پلی‌استایرن معمولی شده و ارتباط بین ذرات نشاسته در ماتریس از بین می‌رود. به این ترتیب ذرات نشاسته از حمله میکروارگانیسم‌ها در امان بوده و تخریب بسیار ناچیزی در این کامپوزیت روی داده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق کامپوزیت پلی‌استایرن معمولی و نشاسته به همراه گلیسیرول به عنوان پلاستی‌سایزر و سازگاردهنده طی فرآیند اختلاط مذاب در یک اکسترودر دو پیچه همسوگرد در نسبت‌های مختلف نشاسته و گلیسیرول تهیه شده است. با توجه به خواص مکانیکی ضعیف نشاسته، افزودن آن به پلی‌استایرن منجر به افت خواص فیزیکی و مکانیکی پلی‌استایرن می‌شود. جهت ارزیابی خواص مقاومت ضربه و دمایی کامپوزیت‌ها، از آزمون‌های مقاومت ضربه آیزود، شاخص جریان مذاب و دمای نرم‌شدگی وایکات استفاده شد. برای بررسی برهمکنش بین اجزاء کامپوزیت‌ها، پایداری حرارتی و فرآیند تخریب، نمونه تحت آنالیز وزن‌سنجی گرمایی قرار گرفتند. جهت بررسی خواص زیست‌تخریب‌پذیری، نمونه‌ها به مدت ۱۲ هفته در زیر خاک دفن شدند و تغییرات وزن آن‌ها طی دوره‌های دو هفته‌ای اندازه‌گیری شد. نتایج تخریب زیستی و آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که سرعت تخریب نمونه‌ها علاوه بر این‌که به درصد نشاسته موجود در کامپوزیت‌ها بستگی دارد، به کیفیت پخش ذرات نشاسته نیز وابسته است. در صورت پخش یکنواخت نشاسته در ماتریس پلی‌استایرن معمولی، دسترسی میکرواورگانیسم‌ها به نشاسته محدود خواهد شد و سرعت تخریب کاهش خواهد یافت. آزمون آیزود با ناچ عدم وابستگی مقاومت ضربه نمونه‌ها به درصد نشاسته را نشان داد. به علت کاهش مراکز تجمع تنش، پخش یکنواخت نشاسته در ماتریس نیز موجب افزایش مقاومت ضربه در آزمون آیزود با ناچ گردید. آزمون شاخص جریان مذاب نشان داد که افزودن نشاسته و گلیسرول به پلی‌استایرن معمولی به ترتیب منجر به افزایش و کاهش ویسکوزیته مذاب نمونه‌ها می‌شود. بررسی نسبت گلیسرول به نشاسته در نتایج بدست آمده نشان داد که در یک مقدار بهینه از پلاستی‌سایزر، برهمکنش بین اجزاء کامپوزیت به نحوی است که بهترین حالت پخش ذرات نشاسته در ماتریس پلی‌استایرن حاصل می‌شود. در این پژوهش مقدار بهینه گلیسیرول زمانی حاصل می‌شود که نسبت گلیسیرول به نشاسته در حدود ۰/۳۳ باشد. حجم فیلر (نشاسته+گلیسیرول) نسبت به ماتریس پلی‌استایرن معمولی باید به حدی باشد که در صورت پخش مناسب ذرات، دسترسی میکروارگانیسم‌ها به نشاسته به طور کامل از بین

نرود. همانطور که در این تحقیق نمونه GPPS-ST10-GL3 با ۱۳درصد وزنی پر کننده با پخش یکنواخت ذرات، در مقابل تخریب زیستی مقاومت نشان می‌دهد.

منابع

[1] A. Ashamol R.R.N. Sailaja, Mechanical, thermal, and biodegradation studies of polystyrene--phthalated starch blends using epoxy functionalized compatibilizer, Journal of Applied Polymer Science, 125(1) (2012) 313-326.

[2] D. Schlemmer, E.R. de Oliveira, M.J.A. Sales, Polystyrene/thermoplastic starch blends with different plasticizers, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 87(3) (2007) 635-638.

[3] R. Smith, Biodegradable polymers for industrial applications, CRC Press, 2005.

[4] H. Tian, Z. Tang, X. Zhuang, X. Chen, X. Jing, Biodegradable synthetic polymers: Preparation, functionalization and biomedical application, Progress in Plymer Science, 37(2) (2012) 237-280.

[5] K. Leja, G. Lewandowicz, Polymer biodegradation and biodegradable polymers - a review, Polish Journal of Environmental Studies, 19 (2010) 255-266.

[6] N. Lucas, C. Bienaime, C. Belloy, M. Queneudec, F. Silvestre, J.E. Nava-Saucedo, Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques - a review, Chemosphere 73(4) (2008) 429-442.

[7] G.E. Luckachan, C.K.S. Pillai, Biodegradable polymers - a review on recent trends and emerging perspectives, Journal of Polymers and the Environmet, 19(3) (2011) 637–676.

[8] P. Forssell, J. Mikkilä, T. Suortti, J. Seppälä, K. Poutanen, Plasticization of barley starch with glycerol and water, Journal of Macromolecular Science, Part A : Pure and Applied Chemistry, 33(5) (1996) 703-715.

[9] D. Schlemmer, M.J.A. Sales, I.S. Resck, Degradation of different polystyrene/thermoplastic starch blends buried in soil, Carbohydrte Polymers, 75(1) (2009) 58–62.

[10] M. Mihai, M.A. Huneault, B.D. Favis, Foaming of polystyrene/thermoplastic starch blends, Journal of Cellular Plastics, 43(3) (2007) 215-236.

[11] A. Mahmoudi Yayshahri, S.J. Peighambardoust, A. Shenavar, Impact, thermal and biodegradation properties of high impact polystyrene/corn starch blends processed via melt extrusion, Polyolefins Journal, 6(2) (2019) 151-158.

[12] L. Yu, K. Dean, L. Li, Polymer blends and composites from renewable resources, Progress in Plymer Science, 31(6) (2006) 576-602.

[13] I. Journals, Effect of Starch on Mechanical, Electrical, Physical, Thermal Properties and Photo/Bio-Degradation of Hips - Starch Blend, 2014.

[14] R. Brown, Handbook of polymer testing: physical methods, CRC Press, 1999.

[15] J. Peerapattana, P. Phuvarit, V. Srijesdaruk, D. Preechagoon A. Tattawasart, Pregelatinized glutinous rice starch as a sustained release agent for tablet preparations, Carbohydrate Polymers 80(2) (2010) 453-459.

[16] C.I.R. Oliveira, F.R. Cunha, C.T. Andrade, Evaluation of biodegradability of different blends of polystyrene and starch buried in soil, Macromolecular Symposia, 290(1) (2010) 115-120.

[17] I. Vroman, L. Tighzert, Biodegradable polymers, Materials (Basel), 2(2) (2009) 307-344.

این صفحه عمداً خالی است